

3 港内操船再現のための操縦運動数学モデルと その簡易構築手法

北川 泰士*, 澤田 涼平**

Mathematical Models for Predicting Ship Motion in Harbor Maneuvering and Survey of Simple Methods for Model Construction

by

KITAGAWA Yasushi and SAWADA Ryohei

Abstract

The National Maritime Research Institute (NMRI) is developing a comprehensive simulation system (CSS) for verifying the safety of autonomous ship systems. The CSS includes a ship-handling simulator and the Fast Time Ship Simulator (FTSS) system. In this study, to develop a tool embedded in the FTSS for simulating a ship's maneuvering motion, we selected mathematical models of a ship's maneuvering motion and surveyed simple methodologies for constructing these models. The models were selected considering the following two aspects of applications in the CSS. First, the models should be able to reproduce the maneuvering motion in various operations including berthing. Second, the models must be computed quickly in order to verify many scenarios. After selecting the models, intending the models can simulate the ship's motion including the roll mode, we surveyed simplified methods for constructing these models from previously published research and accumulated a database of results of the model test owned in the NMRI. Finally, to demonstrate the developed FTSS applying the selected models constructed using the surveyed methods and the database, 4-DOF (surge, sway, roll, and yaw) maneuvering motions in one turning operation were simulated and validated.

* 流体性能評価系運動性能研究グループ, ** 知識データ・システム系知識システム研究グループ

原稿受付 令和 4年 5月 13日

審査日 令和 4年 5月 25日

1. はじめに

自律運航船及び無人運航船の運航時安全性を検証するためのシステムとして、海上技術安全研究所（以降、海技研）では総合シミュレーションシステムの開発を進めている。本システムの中には船舶の広範な操縦運動をシミュレートできる機能も求められている。広範な操縦運動として、例えば、自動離着岸システムの評価を行うためには低速時かつ大斜航状態における船体への流体力を適切に評価できる必要があり、プロペラは正転だけでなく逆転も伴うため、逆転時のプロペラや舵による船体への流体力をモデル化する必要がある。加えて、サイドスラスタを装備する船舶ではそのモデル化も必要であり、前進中の効力低下現象も適切に考慮できれば望ましい。一方、波風中を一定の速力で航走している状況では考慮すべき外力として、水面上上部構造物への風圧抵抗や、出会い波浪によって生じる時間平均的な外力である波漂流力や変動成分である波浪強制力など、が挙げられ、これら流体力特性を対象船に応じて求める必要がある。

ここで、総合シミュレーションシステムはフルミッションシミュレータである操船シミュレータ（Ship Handling Simulator, SHS）と高速に大量のシナリオを検証するためのファストタイムシップシミュレータ（FTSS）により構成される。このため、シミュレータ内で評価される操縦運動は最低限で実時間以下で計算処理される必要がある。また、自動運航の安全性を検証するためのプラットフォームとしての位置付けからは、シミュレーションのための操縦運動数学モデルを幅広い対象船に対して簡易に構築できる機能が求められる。そこで海技研では、これらの要件を念頭に置きつつ、前述の離着岸時操縦運動や波風中の操縦運動をシームレスにシミュレートできるモデルの選定、及び操縦流体力特性として代表されるモデル内係数を簡易に整備できる手法の調査、を進めてきた。本研究ではこれまでの検討結果と共に、調査の結果抽出した現行の課題について報告する。

2. 操縦運動数学モデル

2.1 定式化の検討

本研究では、波浪中船体動揺も含めた 6 自由度船体運動（Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw）の時系列計算が可能な操縦運動計算手法の選定を前提としつつ、運動方程式とその外力項の与え方から検討を始めた。

一般的な船舶操縦運動計算では平面運動である Surge, Sway, Yaw の 3 モードの 3 自由度運動方程式を対象とするが、GM が低い等の理由で横傾斜が生じやすい場合は Roll も含めた 4 モードの 4 自由度運動方程式を取り扱った方が操縦運動の予測精度は高いことが知られている。そして、波浪中の操縦運動を船体動揺まで含めて評価する研究においては、厳密に 6 自由度運動方程式を対象とすることが多い。ここで、6 自由度運動方程式の定式化は剛体力学としては厳密であり、船舶運動学の観点からは運動方程式上で横運動（Sway, Roll, Yaw）の連成を考慮することも基本的には望ましい事である。一方で 6 自由度の場合、船舶の操縦運動が対象である

場合は慣性系のパラメータや流体力特性パラメータが多数となり、モデル係数の簡易な整備という観点からは既存研究の不足もあり相容れない。加えて、外力の一つである操縦運動による船体への流体力は横揺れ角の影響を考慮することが多いが、これらの連成影響の簡易推定手法は既存研究が少ない。

しかし、Roll を含めた 4 自由度運動が評価できることは、操船リスクシミュレータにおける実操船感覚の再現や風による定傾斜発生による安全性の議論等が可能になり、総合シミュレーションシステムの機能向上に繋がるものである。この要求仕様を考慮し、本研究では運動方程式に基づく時系列運動評価は Surge, Sway, Yaw 及び Roll の 4 モードを対象とし、Roll モードの運動方程式は簡易に単独で求解して横運動連成によるパラメータ増を抑える方針とした。そして Heave 及び Pitch の 2 モードは、波浪中変位の時間平均値が操縦運動から受ける影響は微小であると仮定し、運動方程式を時々刻々求解するアプローチを取らず、ストリップ法等の耐航性理論で推定できる周波数領域の規則波中応答関数を用いて、線形重ね合わせ法によって不規則波中の変位の時間変化を表すことにした。

図-1 に本研究の定式化における 4 自由度操縦運動の座標系を示す。斜航角 β は $\beta = \tan^{-1}(-v/u)$ で計算される。

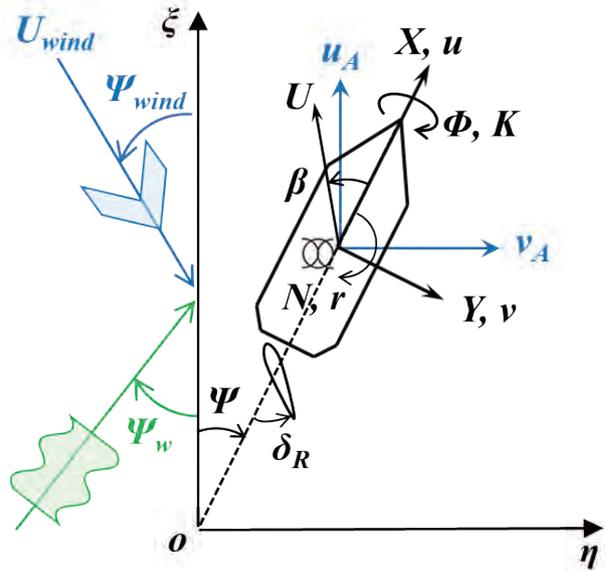


図-1 4 自由度操縦運動モデル座標系

(2.1)式に運動方程式、(2.2)式に各モードの外力項を示す。これらの設定は、基本的には Suzuki ら¹⁾に従いつつ、前述の運動連成の簡略化に則って連成項を削ぎ落したものである。

$$\begin{cases} (m + m_{11})\dot{u} - mvr = X \\ (m + m_{22})\dot{v} + mur + m_{26}\dot{r} = Y \\ (I_{xx} + m_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} - I_{zz}\dot{r} - m_{11}z_{m15}ur + mg\overline{GM} = K \\ (I_{zz} + m_{66})\dot{r} + (m_{22} - m_{11})uv + m_{26}ur + m_{62}\dot{v} = N \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} X = X_0 + X_{f,d} + X_H + X_P + X_R + X_S + X_A + X_{f,k} + X_{dif} + X_{W,D} \\ Y = Y_{f,d} + Y_H + Y_P + Y_R + Y_S + Y_A + Y_{f,k} + Y_{dif} + Y_{W,D} \\ K = K_{f,d} + K_H + K_R + K_A + K_{f,k} + K_{dif} \\ N = N_{f,d} + N_H + N_P + N_R + N_S + N_A + N_{f,k} + N_{dif} + N_{W,D} \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、 m : 排水量, I_{xx} : Roll モードの慣性モーメント, B_{44} : 横揺れ減衰係数, I_{zz} : Yaw モードの慣性モーメント, z_{m15} : 付加質量による流体力の着点高さ, g : 重力加速度, \overline{GM} : 横メタセンタ高さ, を表す。また, m_{ij} は付加質量及び付加慣性モーメントを表し, 添字は j モードの運動によって生じる i モード方向への成分であることを指す。なお, 付加質量及び付加慣性モーメントの与え方は Suzuki ら¹⁾に依り, 波浪中のシナリオでは m_{44} と m_{62} は耐航性理論から求められる想定出合い波周波数の値を設定することを基本線としており, 平水中のシナリオでは全てを平水中相当値で与える。

(2.2)式の各モードの外力項について, これらの与え方は基本的には MMG モデルの考え方²⁾に従うものとした。添字については, H : 操縦運動によって船体に作用する流体力(以降, Hull 流体力), P : プロペラによる流体力, R : 舵による流体力, S : サイドスラスターによる流体力, A : 船体に作用する風圧力, を表す。 X_0 は平水中船体抵抗を表す。他の添字は波浪中シナリオにて考慮すべき外力項であり, f,d : 船体に作用する造波減衰力, f,k : フルードクリロフ力, dif : ディフラクション力, W,D : 入射波の反射により生じる高次波力の時間平均値成分, である。これら定式化も基本的には Suzuki ら¹⁾に従うものである。

2.2 平水中船体抵抗

平水中船体抵抗は(2.3)式の通り表す。

$$\begin{cases} X_0 = \frac{1}{2} \rho S_W u^2 C_T \cdot \text{sign}(u) C_{Tu} \\ C_T = (1+k)C_{F0} + C_W + \Delta C_F \\ C_{F0} = \frac{0.463}{(\log_{10}|Re|)^{2.6}} \end{cases} \quad (2.3)$$

ここで, ρ : 流体の密度, S_W : 浸水表面積, C_T : 全抵抗係数, k : 形状影響係数, C_W : 造波抵抗係数, ΔC_F : 粗度修正量, Re : レイノルズ数, を表す。

相当平板の摩擦抵抗係数 C_{F0} はシェーンヘルの簡易表現式とし, 造波抵抗係数はフルード数 F_n による 5 次程度の多項式近似を取ることを基本として, $F_n \geq 0.1 \sim 0.15$ 等の造波抵抗が生じる領域のみで値を与えるようにする。なお, 極低速域では C_{F0} の値が常用値より高くなるため, レイノルズ数の入力値範囲に制限を設ける等, 取り扱いには適宜注意を払う。 C_{Tu} は後進時には船速の絶対値が同じでも船体抵抗が前進時より若干高いことを表現するために導入した係数である。

これら抵抗係数は水槽模型試験や CFD による抵抗試験結果を解析して求めることが一般的であり, 造船所各社や船会

社各社はデータを有するものと思われる。本研究ではこれら係数の簡易推定のため, 海技研で開発したツールである HOPE Light³⁾を中心に利用することとした。HOPE Light の入力パラメータは最低限で船種・垂線間長(L)・幅(B)・型深さ・喫水(d)・排水量(あるいは肥大係数 C_B)・設計船速(V_s)の 6 種であり, これのみで船舶主要目や種々の推進性能特性を整備することが可能である。一方, 漁船や小型船は HOPE Light の使用の範囲外であるため, 対象船がこれらに該当する場合は過去の文献調査や保有する模型試験結果によって海技研で構成したデータベースから最も近い船型のデータを適用することとした。また, HOPE Light は係数 C_{Tu} の推定機能は無いため, これは海技研の模型試験データベースから適宜与えるものとした。

2.3 Hull モデル

前述の通り, シミュレータ内の操縦運動は港内速力程度の操縦運動状態や離着棧操船時の低速操縦運動状態における Hull 流体力をシームレスに表現できることを念頭に置いている。本研究で利用するモデルを検討した結果, 少ない計算処理で大斜航状態の Hull 流体力が表現可能で, 通常の操縦運動で想定される斜航角でも実用的な推定精度を保つことが見込まれる, 芳村の近似 Crossflow drag モデル⁴⁾を用いることとした。また, Roll モードの Hull 流体力 K_H は, 2.1 項で示した通り, Roll 角 Φ による成分を含めず, Y_H による Roll モード成分のみ取り扱うこととする。(2.4)式に Hull モデル計算式を示す。

$$\begin{cases} X_H = \frac{1}{2} \rho L d \cdot (m'_y + X'_{vr} + \Delta X'_{vr}) L v r \\ Y_H = \frac{1}{2} \rho L d \cdot [Y'_v v |u| + (Y'_r - m'_x) L r u - C_D [v |u| \\ - C_{rY}^2 L^2 \{ -(\frac{1}{12} - \frac{r'}{32}) r^2 \frac{v}{u} + \frac{r'}{32} r |r| \}] \\ Y_H = \frac{1}{2} \rho L^2 d \cdot \{ [N'_v u v + N'_r L r |u|] - C_D [\frac{r'}{12} v |v| \\ - C_{rN} \{ (\frac{1}{6} - \frac{C_{rN} L}{32} \frac{|Lr|}{u}) r \frac{v^2}{u} + L^2 \frac{C_{rN} r}{32} |r| \}] \\ K_H = -Z_{YH} Y_H \end{cases} \quad (2.4)$$

ここで, (2.4)式の各係数は芳村ら⁴⁾が船型主要目による簡易推定式を示している。係数 z_{YH} は Y_H によるモーメントレバーを表しており, 着力点を喫水の半分の深さ位置と見なし¹⁾, 着力点と船体重心高さの鉛直方向位置の差から求める。

2.4 プロペラモデル及び舵モデル

プロペラモデルは(2.5)式の通りプロペラ単独特性と船体とプロペラの干渉係数の積によって表す。

$$\begin{cases} X_P = (1 - t_p) \rho n^2 D^4 \cdot K_T [J] \\ J = \frac{u(1-w_p)}{nD} \end{cases} \quad (2.5)$$

ここで, t_p : 推力減少率, n : プロペラ回転数, D : プロペラ直径, K_T : プロペラ推力係数(プロペラ推力単独特性曲線), J : プロペラ前進定数, w_p : プロペラ有効伴流係数, を表す。

加えて、プロペラ逆転時には舵角が 0 度であっても Sway 方向・Yaw 方向に力が生じることが知られている。これらは不平衡流体力⁹⁾と呼ばれ、(2.5)式と同様の無次元化により流体力の傾向が整理できると言われている。本研究では、(2.6)式の通り、Roll モードではその影響を無視し、Yaw モードについては Sway モードの不平衡流体力と着力点 (= $x_{PR}'L$) によって表現する計算式を取ることにした。

$$\begin{cases} Y_P = \begin{cases} 0, & \text{where } n \geq 0 \\ \text{else, } \rho n^2 D^4 \cdot Y_P^* \end{cases} \\ N_P = \begin{cases} 0, & \text{where } n \geq 0 \\ \text{else, } \rho n^2 D^4 \cdot Y_P^* \cdot x_{PR}'L \end{cases} \end{cases} \quad (2.6)$$

これらプロペラモデル中の係数推定について、プロペラ正転時のモデル係数は HOPE Light³⁾によって推定が可能である。プロペラ逆転時の係数は過去の文献調査による不平衡流体力データベースや海技研で実施した水槽模型試験結果に基づいて与えることとした。ここで、プロペラ推力の単独特性曲線は、翼形状が MAU や B-series なら要目ベースの推定回帰式^{9),7)}が存在するが、他の翼形状の場合は適切な算定が必要である。

2.5 舵モデル

舵モデルは一般的な MMG モデルの表現に従い、(2.7)式の通り舵直圧力による各方向成分と干渉係数の積によって表される。

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta_R \\ Y_R = -(1 + a_H)F_N \cos \delta_R \\ N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta_R \\ K_R = -z_R Y_R \end{cases} \quad (2.7)$$

ここで、 F_N : 舵直圧力、 δ_R : 舵角、 t_R, a_H, x_H : 船体・プロペラ・舵間の干渉係数、 $z_R = Y_R$ による Roll モーメントレバー、を表す。 z_R は舵高さの中心位置を着力点とし、船体重心位置との差によって決定する。

舵直圧力 F_N は(2.8)式の通り計算され、舵直圧力勾配係数 C_N は(2.9)式の通り、プロペラ逆転を伴う場合は舵への有効流入角 α_R が -180 度から $+180$ 度迄の範囲を取り得ることから、ストール角 α_{Rstl} 以降はストール時の値を保つ簡易的な表現とした。

$$\begin{cases} F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 C_N(\alpha_R) \\ U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$C_N = \begin{cases} C_{N0} \sin \alpha_R, & \text{for } 0 \leq |\alpha_R| < |\alpha_{Rstl}| \\ \text{or } (\pi - |\alpha_{Rstl}|) \leq |\alpha_R| \leq \pi \\ C_{N0} \sin(\text{sgn}(\alpha_R) \cdot \alpha_{Rstl}), & \\ \text{for } |\alpha_{Rstl}| < |\alpha_R| < (\pi - |\alpha_{Rstl}|) \end{cases} \quad (2.9)$$

ここで、 A_R : 舵側面積、 C_{N0} : 舵直圧力勾配係数、を表す。舵位置の前後方向有効流入速度 u_R 及び横方向有効流入速度 v_R はそれぞれ(2.10)式、(2.11)式の通り表す。

$$\begin{cases} u_R = \text{sign}(u_{R.sqr}) \sqrt{|u_{R.sqr}|} \\ u_{R.sqr} = D/H_R \cdot u_{R1} |u_{R1}| + (1 - D/H_R) u_{R2} |u_{R2}| \\ u_{R1} = \begin{cases} u(1 - w_R) + k_x \cdot u(1 - w_P) \\ \times (\sqrt{1 + 8K_T/\pi J^2} - 1), & \text{for } n > 0 \\ k_x \cdot n D_P \sqrt{8|K_T|/\pi}, & \text{for } n < 0 \end{cases} \\ u_{R2} = u(1 - w_R) \end{cases} \quad (2.10)$$

$$v_R = -\gamma_R(v - l_R r) \quad (2.11)$$

ここで、 H_R : 舵高さ、 w_R : 舵の有効伴流係数、 k_x : プロペラ増速率、 γ_R : 船体横流れ速度に係る整流係数、 l_R : 回頭角速度に係る整流係数、を表す。

(2.10)式はプロペラ逆転時にプロペラ回転流が後方から前方に流れることを実用的に表現するモデルであり、著者の過去の研究⁸⁾にてプロペラ逆転時の舵直圧力を推定できることを示している。記載こそ異なるが正転時は MMG モデルの標準モデル²⁾と同じ計算式である。

これらの係数の推定について、まず要目である A_R と H_R は HOPE Light を用いることで整備が可能である。干渉係数である t_R, a_H, x_H は過去の研究により船種に応じた簡易算定^{9),10)}が可能である。一方で、プロペラ逆転時におけるこれら干渉係数の分析は研究事例が少なく⁸⁾、海技研では過去の模型試験結果から最も近い船型の値を充てている。 C_{N0} は藤井の式¹¹⁾によって舵アスペクト比から推定可能であるが、特殊な翼断面形状の舵の場合は要目による回帰式はなく、文献調査等により注意して算定する必要がある。プロペラ後流中のストール角 α_{Rstl} は一般的なマリナー舵では ± 35 度程度¹²⁾、シリング舵では ± 70 度程度¹³⁾、が目安となるが、体系的な推定手法はなく今後の研究が待たれる。プロペラ増速率 k_x は正転時は 0.6 程度が標準値¹⁴⁾とされており、逆転時は著者の過去の研究により 0.144 が痩せ型船と肥型船の平均値であることを示している。 w_R は著者らの模型試験結果データベースからは w_P と同じ値を取って概ね差し支えない。一方、後進時は舵やプロペラが流れの先端に入るため、少数ながらも模型試験による分析結果を考慮すると、実用的には値を 0 にとっても差し支えない。整流係数についても過去の研究から回帰式やデータベース^{9),10)}が公表されており、計算式の違いに留意する必要があるが、簡単な要目から推定可能である。一方、逆転時や後進時における研究例は少なく、簡易推定手法は構築されていない。本研究では、逆転時でも前進中は正転時と同じ値を与え、後進時は干渉影響がないものと見なして $[\gamma_R, l_R] = [1.0, -0.5]$ を与えることとした。

2.6 風圧力モデル

風圧力モデルは(2.12)式の通り、見掛けの風速 U_A と風向 Ψ_A を用いて表す。

$$\begin{cases} X_A = \frac{1}{2}\rho_A A_F U_A^2 C_{AX}(\Psi_A) \\ Y_A = \frac{1}{2}\rho_A A_L U_A^2 C_{AY}(\Psi_A) \\ N_A = \frac{1}{2}\rho_A A_L L_{oa} U_A^2 C_{AN}(\Psi_A) \\ K_A = \frac{1}{2}\rho_A A_L H_b U_A^2 C_{AK}(\Psi_A) \end{cases} \quad (2.12)$$

ここで、 ρ_A : 空気の密度、 A_F : 水面上構造物の正面投影面積、 A_L : 水面上構造物の側面投影面積、 L_{oa} : 船の全長、 H_b : Roll 方向風圧力の着力点高さ、を表す。

見掛けの風速と風向は空間固定座標系 (α - ζ - η 系) における真風速 U_{wind} と真風向 Ψ_{wind} を用いて(2.13)及び(2.14)式の通り表す。

$$\begin{cases} U_A = \sqrt{u_A^2 + v_A^2} \\ \begin{bmatrix} u_A \\ v_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{wind} \cos \Psi_{wind} - u \cos \Psi + v \sin \Psi \\ U_{wind} \sin \Psi_{wind} - u \sin \Psi - v \cos \Psi \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\Psi_A = \tan^{-1}(v_A/u_A) - \Psi \quad (2.14)$$

風圧力係数 (C_{AX} , C_{AY} , C_{AN} , C_{AK}) 及び(2.12)式上の要目は藤原の成分分離型推定法を元にした簡易推定法である Kitamura らの手法¹⁵⁾を用いて求める。

2.7 波浪中船体動揺 (Heave, Pitch) 及び波浪外力

前述の通り、Heave 及び Pitch の2モードは一定船速及び一定の波向きにおいて周波数領域前提の手法で求めた規則波中応答関数データベースに基づいて、線形重ね合わせ法により不規則波中の変位時系列を計算する方針とした。後述の試計算では波浪中シナリオは取り扱わないため、本稿では記載を省略する。

また、Surge, Sway, Roll Yaw の4モードでは、(2.2)式で示したように波浪中シナリオでは考慮されるべき外力項が多数存在する。これら計算のためには没水部の形状データや水線面積形状が必要になり、計算モデルの簡易構築に関する研究は多くない。不規則波中における実用計算法に関する研究も含め、現状では課題は多いことを記しておく。

3. テスト船による試計算

3.1 概要及び対象のテスト船

本研究で示した計算モデル及びモデルの簡易構築手法のデモンストレーションとして、テスト船に対してモデル構築を行って試計算を行うこととした。テスト船として選定したのは架空の内航コンテナ船である。主要目及び計画速力を表-1に示す。この船種と主要目からモデル構築を図る。

表-1 テスト船(内航コンテナ船)の主要目及び計画速力

L_{pp} [m]	B [m]	型深さ [m]	d [m]	C_b	V_s [kt]
78.0	13.0	8.0	6.5	0.7	12.0

試計算のシナリオとして、外乱の無い平水中の旋回試験を設定した。低速状態計算の検証のため停止状態から計算を開

始し、計算開始から10秒後にプロペラ回転数を118RPMに上げ、計算開始から50秒後に舵角を+35度に転舵することとした。

3.2 モデル構築

テスト船に対するモデル構築結果について、前進想定時の一部結果を示す。まず、HOPE Light の利用例として、平水中船体抵抗係数を求めた結果を図-2に示す。造波抵抗は $F_n=0.16$ 付近から生じるものとした。また、他の HOPE Light の出力として、表-2のモデル内パラメータも示しておく。

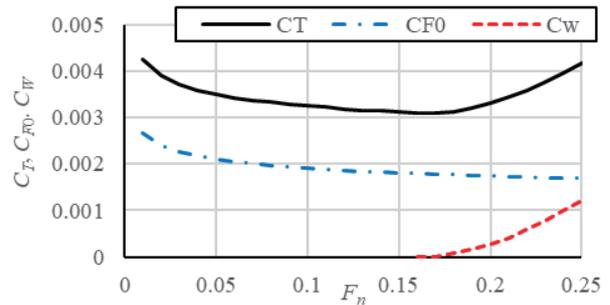


図-2 テスト船の平水中船体抵抗特性

表-2 HOPE Light で出力したモデル内パラメータ

S_w [m ²]	D [m]	A_R [m ²]	H_R [m]	WP	TP
1693	3.71	9.90	5.53	0.381	0.186

Hull モデル内パラメータは文献4)から求め、舵モデルのパラメータは対象船が内航コンテナ船であることを念頭に置いて文献10)から求めた。

他にも、運動方程式上の付加質量及び付加慣性モーメントは元良チャートを表す重回帰式¹⁶⁾から推定した。一方で、Roll モードの運動方程式中パラメータは推定回帰式が豊富ではなく、今回のテスト船に対しては造船工学系のテキストや海技研保有のデータベースから適宜引用して設定している。

3.3 旋回試験による航跡及び船体運動の試計算

図-3に試計算の結果を示す。まず、旋回航跡を含め、操舵開始からの過渡状態から定常旋回に至るまでの過程が問題なく計算されている。設計速力からの旋回試験では回頭角が270度から360度になる間には既に定常旋回状態になることが多く、本試計算では定常状態に至るまでにやや時間を要している印象である。これは停止状態から計算を開始するために船の慣性の大きさから時間を要したものと推測できる。Roll 角 Φ の挙動について分析すると、転舵後すぐに右傾斜が発生してその後の旋回の発達に伴って左傾斜となっている。これは、最初に右転舵による正の Roll モーメントが発生した後、旋回運動による流体力から生じる負の Roll モーメントがそれを上回ったものである。旋回運動時の初期の内傾斜とその後の外向傾斜は一般的に知られるものであり、その他の旋回運動を含め、以上から提案した計算モデルとモデル構築法

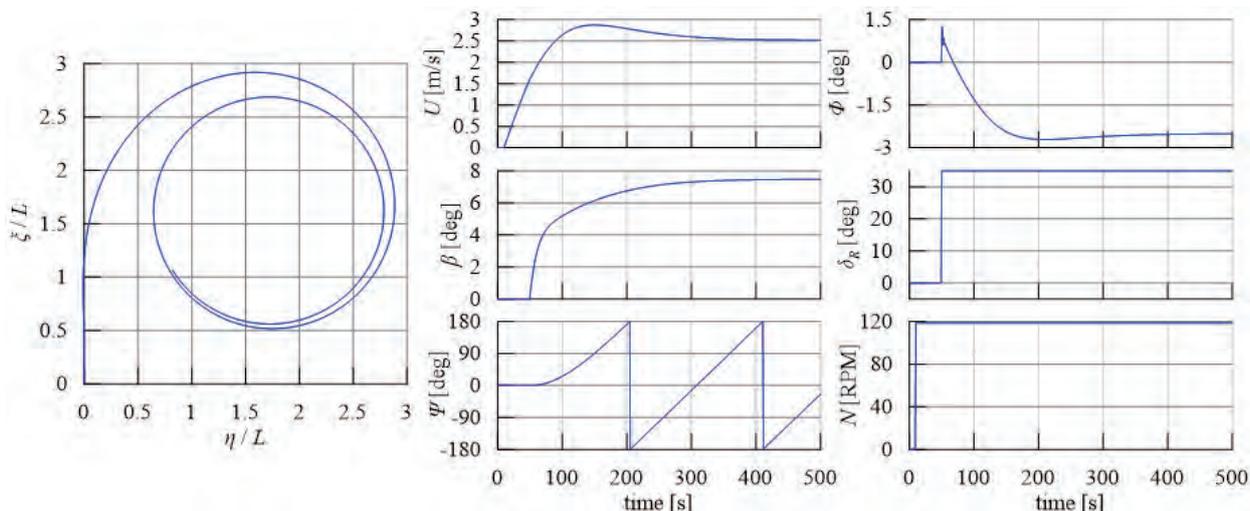


図-3 平水中+35度旋回試験 運動計算結果

によって4自由度の旋回運動が少なくとも定性的には再現されていることが示された。

5. まとめ

本研究では、自動運航船の安全性検証のための総合シミュレーションシステムの機能開発の一環として、離着岸時の操縦運動を含めた広範な操縦運動をシミュレートするための操縦運動数学モデル選定と、外力モデル中の係数及び定数を船舶主要目等の少ない情報から推定するための簡易推定手法の整備を行い、現状の課題も含めてその概要を報告した。そして、平水中の停止状態からの旋回操船をテストシナリオとして、架空の内航コンテナ船を対象船として試算を行い、定性的な旋回挙動が再現できていることを示した。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人日本財団の助成を受けて、一般財団法人日本船舶技術研究協会が行う「MEGURI2040に係る安全性評価」事業の委託研究として行われております。また、一般財団法人日本海事協会よりサポートと有益な助言をいただきました。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) Suzuki Ryosuke, et al.: Numerical simulation of 6-degrees-of-freedom motions for a manoeuvring ship in regular waves, *Applied Ocean Research*, Vol.113, (2021).
- 2) Yasukawa Hironori, Yoshimura Yasuo: Introduction of MMG standard method for ship maneuvering prediction, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.20, (2015), pp.37-52.
- 3) 一ノ瀬康雄, 久米健一: 船型要目最適化プログラム HOPE Light, 海上技術安全研究所報告, 第15巻 第4号, (2016), pp.407-419.
- 4) 芳村康男, 高瀬康一, 福井寛史, 他: 風力下で漂流する船舶の簡易数学モデルによる運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第31号, (2020), pp.47-57.

- 5) 藤野正隆, 切田篤: プロペラ逆転時による制動時の船の操縦性について (第一報), 関西造船協会誌, 第169号, (1978), pp.57-70.
- 6) 例えば, 公益社団法人日本船舶海洋工学会: 船舶海洋工学シリーズ~①船舶性能設計, (2013).
- 7) Lammeren Van., et al.: The Wageningen B-Screw Series, *Transactions of SNAME*, Vol.77, (1969), pp.269-317.
- 8) 北川泰士, 塚田吉昭, 宮崎英樹: プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第20号, (2015), pp.117-120.
- 9) 青木伊知郎, 他: 実船の操縦性能推定法に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第3号, (2006), pp.157-165.
- 10) 芳村康男, 増本友美子: 中速商船・漁船船型の操縦流体力データベースと操縦運動の一推定法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号, (2011), pp.63-73.
- 11) 藤井斉, 津田達雄: 自航模型による舵特性の研究 (2), 造船協会論文集, 第110号, (1961), pp.31-42.
- 12) 中武一明, 他: 舵に働く流体力について, 西部造船会々報, 第63号, (1981), pp.65-77.
- 13) Suzuki Ryosuke, Tsukada Yoshiaki, Tsujimoto Masaru, et al.: A study on high-lift rudder performance in adverse weather based on model tests under high propeller load, *Ocean Engineering*, Vol.136, (2017), pp.152-167.
- 14) 例えば, 運動性能研究委員会: 操縦性研究の設計への応用 (第2章), 運動性能研究委員会 第12回シンポジウムテキスト, (1995).
- 15) Kitamura Fumitoshi, Ueno Michio, et al.: Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, *Ships and offshore structures*, Vol.12 No.8, (2017), pp.1-9.
- 16) 森正彦: 船型設計, (1996).